

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Penelitian Terkait**

Penelitian oleh Runaldy Sahputra dan Syukriyadin membahas “Analisis Penempatan *Static Var Compensator* (SVC) Pada Sistem Interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV Menggunakan Metode *Bus Participation Factor*”, Metode aliran daya yang digunakan yaitu *Fast Decoupled* dengan perhitungan menggunakan *Software MATLAB series 7.13.0.564 (R2011b)*.

Penelitian yang dilakukan oleh Runaldy Sahputra dan kawan-kawan ini bertujuan untuk menentukan penempatan optimal SVC pada jaringan interkoneksi Sumut-Aceh 150 kV, yaitu pada salah satu Gardu Induk antara Langsa s/d Banda Aceh, yang dilihat dari bus terlemah menggunakan metode bus *participation factor*

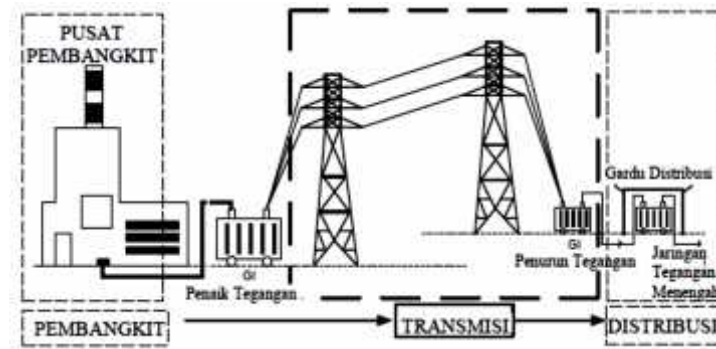
Kemudian Syarifil Anwar, Hadi Suyono, Harry Soekotjo, berjudul “Optimisasi Penempatan SVC untuk Memperbaiki Profil Tegangan dengan Menggunakan *Algoritma Genetika*”.

Penelitian yang dilakukan oleh Syarifil Anwar dan kawan-kawan ini membahas optimasi penempatan SVC dengan menggunakan metode (*Genetic Algorithm*) GA pada sistem Jawa Madura Bali 500 kV untuk memperbaiki profil tegangan sistem melalui minimalisasi rugi-rugi jaringan transmisi dengan menggunakan Metode *Algoritma Genetika*.

Dari penelitian yang telah dilakukan diatas, maka penulis berinisiatif ingin menganalisis penempatan SVC (*Static Var Compensator*) untuk mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan distribusi 20kV Rayon Bangkinang Wilayah Salo. Penelitian yang akan dilakukan sekarang menggunakan *Etap 7.5.0* yang berbasis *Grafik User Intervace* (GUI) yang memudahkan untuk menganalisis aliran daya listrik dan memiliki komponen yang mirip dengan sebenarnya. Adapun metode yang digunakan untuk studi aliran daya adalah Metode *Newton Rapson*. Dimana Metode *Newton Rapson* ini memiliki perhitungan yang lebih baik untuk sistem tegangan yang besar, karena lebih efesien dan praktis. Dengan kemampuan *Etap 7.5.0* yang bisa dikontrol dengan melihat GUI, maka penempatan SVC (*Static Var Compensator*) dapat dilakukan dengan melihat analisis aliran daya.

## 2.2. Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik (*Electric Power System*) terdiri dari tiga komponen utama yaitu: sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, dan sistem distribusi tenaga listrik.



Gambar 2.1. Tiga Komponen Utama Dalam Penyaluran Tenaga Listrik [5]

Komponen dasar yang membentuk suatu sistem tenaga listrik adalah generator, transformator, saluran transmisi dan beban. Untuk keperluan analisis sistem tenaga, diperlukan suatu diagram yang dapat mewakili setiap komponen sistem tenaga listrik tersebut. Diagram yang sering digunakan adalah diagram satu garis dan diagram impedansi atau diagram reaktansi.

Pusat pembangkit listrik (*Power Plant*) yaitu tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak mula (*Prime Mover*) dan generator yang membangkitkan listrik. Biasanya dipusat pembangkit listrik juga terdapat gardu induk. Peralatan utama pada gardu induk antara lain: Transformator, yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator (11,5kV) menjadi tegangan transmisi/tegangan tinggi (150kV) dan juga peralatan pengaman dan pengatur. Jenis pusat pembangkit yang umum antara lain PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTD (Pusat Listrik Tenaga Diesel), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas) dan PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir).

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari tempat pembangkit tenaga listrik (*Power Plant*) hingga saluran distribusi listrik (*substation distribution*), sehingga dapat disalurkan sampai pada konsumen pengguna listrik.

Sistem distribusi merupakan subsistem tersendiri yang terdiri dari pusat pengatur *Distribution Control Center* (DCC), saluran tegangan menengah (6kV, 12kV dan 20kV, yang juga biasa disebut tegangan distribusi primer) yang merupakan saluran udara atau

kabel tanah, gardu distribusi tegangan menengah yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan menengah dan trafo sampai dengan panel-panel distribusi tegangan rendah (380V/220V) yang menghasilkan tegangan kerja/tegangan jala-jala untuk industri dan konsumen[3].

### **2.3. Jaringan Distribusi**

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen. Fungsi distribusi tenaga listrik adalah;

1. Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan).
2. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11kV sampai dengan 24kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ( $I^2.R$ ). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 380/220 volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder kekonsumen-konsumen.

Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo *step-up*.

Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-perengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban, maka, pada

daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo *step-down*. Bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda[3].

Jaringan distribusi berdasarkan letak pada posisi gardu distribusi dibedakan menjadi 2 yaitu :

1. Jaringan distribusi primer (jaringan distribusi tegangan menengah).

Jaringan distribusi primer merupakan suatu jaringan yang letaknya sebelum gardu distribusi berfungsi menyalurkan tegangan listrik bertegangan menengah (misalkan 6kV, 12kV atau 20kV) hantaran dapat berupa kabel dalam tanah atau salauran/kawat udara yang dihubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer trafo distribusi).

2. Jaringan distribusi sekunder (jaringan distribusi tegangan rendah).

Jaringan distribusi sekunder merupakan suatu jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi berfungsi menyalurkan tegangan listrik bertegangan rendah (misalkan 380/220 volt). Hantaran dapat berupa kabel dalam tanah atau salauran/ kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ketempat konsumen atau pemakaian (misalnya kerumah-rumah).

Sedangkan untuk gardu distribusi sendiri adalah suatu tempat/sarana dimana terdapat transformator *step-down* yaitu transformator yang dapat menurunkan tegangan menengah menjadi rendah (sesuai dengan kebutuhan konsumen).

## **2.4. Daya**

Dalam proses transmisi dan distribusi tenaga listrik sering kali mengalami rugi-rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi daya pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo yang digunakan .Kedua rugi- rugi daya tersebut memberikan pengaruh yang besar terhadap kwalitas daya serta tegangan yang dikirimkan kesisi pelanggan. Nilai tegangan yang melebihi batas toleransi akan dapat menyebabkan tidak optimalnya kerja dari peralatan listrik disisi konsumen[8].

Secara umum pengertian daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha. Daya listrik biasanya diaktifkan dalam satuan Watt.

Dimana,

$$P = V I \quad (2.1)$$

Terdapat tiga macam daya yaitu[1]:

1. Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah daya yang terpakai untuk melakukan usaha atau energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah watt.

$$P_{1\theta} \approx V I \cos \theta \quad (2.2)$$

2. Daya Reaktif (Q)

Daya Reaktif (*reactive power*) adalah daya yang disuplai oleh komponen reaktif. Satuan daya reaktif adalah VAR.

$$Q_{1\theta} \approx V I \sin \theta \quad (2.3)$$

3. Daya Semu (S)

Daya semu (*apparent power*) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan rms ( $V_{rms}$ ) dan arus rms ( $I_{rms}$ ).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$P$  = Daya Aktif (Watt)

$Q$  = Daya Reaktif (Var)

$S$  = Daya Semu (VA)

$V$  = Tegangan (V)

$I$  = Arus (A)

$\theta$  = sudut

## 2.5. Faktor Daya

Faktor daya adalah perkalian antara arus dan tegangan. Perkalian arus dan tegangan dalam rangkaian AC diaktifkan dalam *Volt Ampere*(VA) atau *KiloVolt Ampere* (kVA).

Dalam teori listrik arus bolak-balik penjumlahan daya dilakukan secara *vektoris*, yang dibentuk vektornya merupakan segitiga siku-siku, yang dikenal dengan segitiga daya. Sudut merupakan sudut pergeseran fasa, semakin besar sudutnya, semakin besar daya

semu (S), dan semakin besar pula daya reaktif (Q), sehingga faktor daya ( $\cos \theta$ ) semakin kecil. Perbandingan antara besar daya aktif dengan daya semu disebut faktor daya ( $\cos \theta$ ).

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \quad (2.5)$$

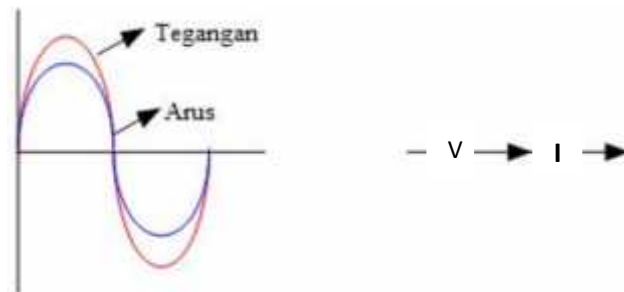
Keterangan :  $\cos \theta$  : Faktor Daya

P : Daya Aktif (Watt)

S : Daya Semu (VA)

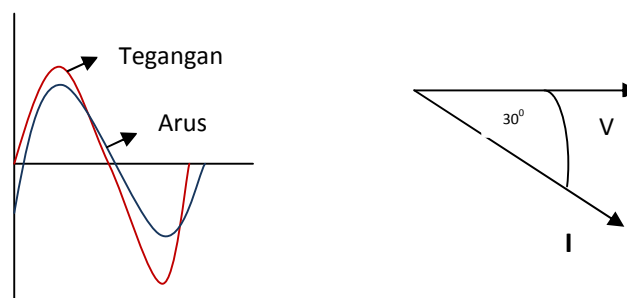
Ada tiga kemungkinan hubungan fasa antara arus dan tegangan dalam satuan rangkaian[7].

1. Arus dan tegangan mungkin sephas seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



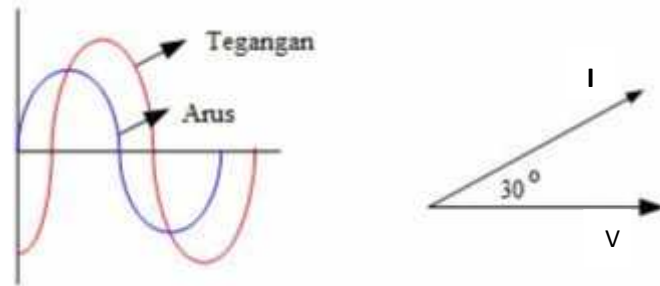
Gambar 2.2. Arus dan Tegangan [7]

2. Faktor daya tertinggal (*lagging*) yaitu tegangan dapat melalui harga nol dan naik ke harga tertinggi pada waktu yang lebih dahulu dari arus seperti dalam gambar dibawah. Dalam hal ini arus dikatakan tertinggal dari tegangan.



Gambar 2.3. Arus Tertinggal 30° Dari Tegangan [7]

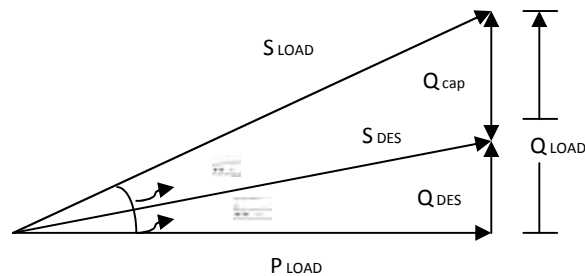
3. Faktor daya mendahului (*leading*) yaitu tegangan dapat melalui harga nol dan harga tertingginya pada beberapa saat kemudian dari pada arus seperti dalam gambar dibawah. Dalam hal ini arus dikatakan mendahului tegangan.



Gambar 2.4. Arus Mendahului 30° Dari Tegangan [7]

Lamanya waktu dimana arus mendahului atau tertinggal dari tegangan bervariasi dalam rangkaian yang berbeda dari kondisi sephasa sampai mendahului atau tertinggal ¼ siklus atau 90°. Oleh karena itu waktu dapat diukur dalam derajat listrik, beda waktu atau beda fasa dari arus dan tegangan biasanya diaktifkan dalam derajat listrik dan disebut sudut fasa[7].

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya semu dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.5. Segitiga Daya [7]

Penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif menghasilkan daya semu.

Dimana:  $P_{Load}$  = daya aktif (kW)  
 $Q_{Load}$  = daya reaktif (kVAR)  
 $S_{Load}$  = daya semu(kVA)

Daya reaktif kompensator

$$Q_{Cap} = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (2.6)$$

Dimana:

P	: Daya Aktif (Watt)	$\theta_1$	: Sudut Sebelum Diperbaiki
$Q_{cap}$	:Daya Reaktif Kompensator (VAR)	$\theta_2$	: Sudut Setelah Diperbaiki
S	: Daya Semu (VA)		

## 2.6. Rugi - Rugi Daya

Rugi-rugi atau *losses* adalah hilangnya sejumlah energi, yang dibangkitkan sehingga mengurangi jumlah energi yang dapat dijual kepada konsumen sehingga berpengaruh pada tingkat profitabilitas perusahaan bersangkutan. Besar kecilnya rugi-rugi dari suatu sistem tenaga listrik menunjukkan tingkat efisiensi sistem tersebut, makin rendah persentase rugi-rugi yang terjadi makin efisien sistem tersebut. Selain itu rugi-rugi daya yang besar akan menimbulkan kerugian yang finansial disisi perusahaan pengelola listrik[10].

Seperti diketahui, kerugian daya suatu saluran merupakan perkalian arus pangkat dua dengan resistansi atau reaktansi dari saluran tersebut. Rugi- rugi dapat diaktifkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{Rugi daya aktif} &= I^2 \cdot R \text{ (watt)} \\ \text{Rugi daya reaktif} &= I^2 \cdot X \text{ (Var)} \\ \text{Rugi daya semu} &= \sqrt{(I^2 \cdot R)^2 + (I^2 \cdot X)^2}\end{aligned}$$

Dimana :     I        = Arus (A)  
              X        = Reaktansi  
              R        = Resistansi

Besarnya rugi daya pada beban 1 fasa dan 3 fasa dapat dituliskan adalah.

$$P_{L,1\phi} = 2 \times I_{1\phi}^2 R \quad (\text{watt}) \quad (2.7)$$

dan

$$P_{L,3\phi} = 2 \times I_{3\phi}^2 R \quad (\text{watt}) \quad (2.8)$$

jika disubstitusikan persamaan diatas menjadi

$$\frac{P_{L,1\phi}}{P_{L,3\phi}} = 2.0 \quad (2.9)$$

## 2.7. Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya atau tegangan sistem dalam kondisi operasi konstan. Informasi ini sangat dibutuhkan guna mengevaluasi unjuk kerja sistem tenaga dan menganalisis kondisi pembangkitan maupun pembebanan. Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik jaringan listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang



diharapkan akan terjadi dimasa yang akan datang. Adapun tujuan dari studi analisa aliran daya antara lain[5]:

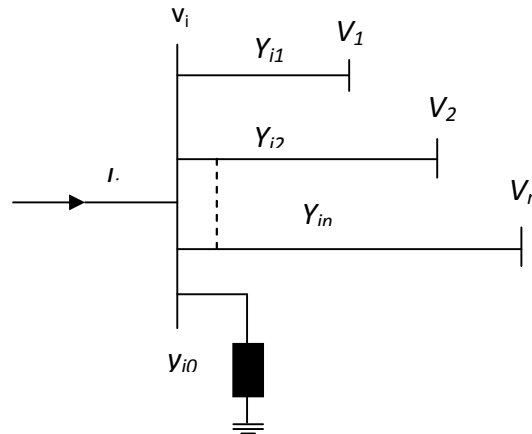
1. Untuk mengetahui tegangan-tegangan pada setiap bus yang ada dalam sistem maupun sudut fasa tegangan.
2. Untuk mengetahui daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran yang ada dalam sistem.
3. Untuk mengetahui kondisi dari semua peralatan, apakah memenuhi batas-batas yang ditentukan untuk menyalurkan daya listrik yang diinginkan.
4. Untuk memperoleh kondisi mula pada perencanaan sistem yang baru.
5. Untuk memperoleh kondisi awal untuk studi-studi selanjutnya seperti: studi hubung singkat, stabilitas, dan pembebanan ekonomis.

Beberapa hal diatas sangat diperlukan untuk menganalisa keadaan sekarang dari sistem guna perencanaan perluasan sistem yang akan datang. Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui yakni:

1. Bus Referensi (*slack bus*). Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.
2. BUS PQ (bus beban). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.
3. BUS PV (bus pembangkit). Pada tipe bus ini, besar tegangan dan daya aktif telah ditentukan sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

Sistem tenaga listrik tidak hanya terdiri dari dua bus, melainkan terdiri beberapa bus yang akan diinterkoneksi satu sama lain. Daya listrik yang diinjeksikan oleh generator kepada salah satu bus, bukan hanya dapat diserap oleh beban bus tersebut, melainkan dapat diserap oleh beban di bus yang lain.

Diagram satu garis tipe bus dari suatu sistem tenaga listrik terdapat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6. *Tipikal Bus Dari Sistem Tenaga* [1]

Jaringan sistem tenaga seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 saluran transmisinya dapat digambarkan dengan model yang mana impedansi-impedansinya telah diubah menjadi admitansi-admitansi per unit pada base/dasar MVA.

Aplikasi hukum arus *Kirchhoff* pada bus ini diberikan dalam bentuk:  
 arus pada bus i adalah :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=i}^n y_{ij} V_j \quad \text{dimana } j \neq i \quad (2.10)$$

Dimana,

- $I_i$  = Arus Pada Bus i (A)
- $V_i$  = Tegangan Pada i (V)
- $V_j$  = Tegangan Pada j (V)
- $y_i$  = Admitansi Pada Bus i (Siemens)
- $y_j$  = Admitansi Pada Bus j (Siemens)

## 2.8. Metode *Newton Raphson*

Adapu metode yang digunakan untuk studi aliran daya adalah Metode *Newton Raphson*. Dimana Metode *Newton Raphson* ini memiliki perhitungan yang lebih baik dari pada *Gauss Seidel*. Bila untuk sistem tegangan yang besar, karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk memperoleh pemecahan ditentukan berdasarkan ukuran sistem. Dalam persamaan ini aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar.

Dalam bentuk admintasi persamaan (2.10) dapat ditulis menjadi[1]:

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} y_{ij} \quad (2.11)$$

atau dalam berbentuk polar menjadi:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij} V_j| \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.12)$$

daya komplek di bus i adalah :

$$P_i - j Q_i = V_i e^{-j\delta_i} \sum_{j=1}^n |Y_{ij} V_j| \angle(\theta_{ij} + \delta_j) \quad (2.13)$$

daya aktif di bus i adalah :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij} V_j V_i| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.14)$$

daya reaktif di bus i adalah :

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij} V_j V_i| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.15)$$

Untuk setiap bus beban akan dibentuk persamaan  $P_i$  dan  $Q_i$ , sedangkan untuk bus pembangkit akan dibentuk persama  $P_i$  dengan memasukkan nilai taksiranbesaran tegangan  $|V|$  dan sudut  $\delta$  di setiap bus. Memperluas persamaan (2.14) dan persamaan (2.15) ke dalam deret *Taylor* dan order pertama maka diperoleh persamaan :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

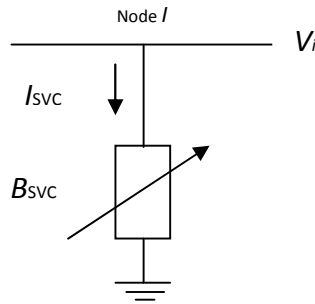
Dimana  $J_1, J_2, J_3$ , dan  $J_4$  adalah matrik *Jakobian* dengan elemen sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial |V|} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

## 2.9. SVC (*Static Var Compensator*)

SVC (*Static Var Compensator*) adalah komponen FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) dengan hubungan paralel, yang fungsi utamanya untuk menyuntikkan atau menyerap daya reaktif statis yang terkendali dan dihubungkan paralel yang mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk mempertahankan atau mengontrol variabel tertentu pada sistem tenaga listrik, terutama tegangan pada bus.

Prinsip kerja SVC (*Static Var Compensator*) yaitu dengan cara mengatur sudut penyalan *thyristor*, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC (*Static Var Compensator*). Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalan *thyristor*. Dengan demikian SVC (*Static Var Compensator*) akan memberikan kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem[9]. Dalam bentuk yang paling sederhana, SVC (*Static Var Compensator*) terdiri dari komponen *Fixed Capacitor* (FC) yang terhubung paralel dengan *Thyristor-Controlled Reactor* (TCR). Kontrol sudut penyalan *thyristor* memungkinkan SVC (*Static Var Compensator*) untuk memiliki kecepatan respon yang hampir seketika. Hal ini digunakan secara luas untuk menyalurkan daya reaktif dan menyediakan *support* regulasi tegangan dengan cepat. Selain itu, SVC (*Static Var Compensator*) juga dipakai untuk meningkatkan batas stabilitas sistem dan mengurangi osilasi daya[6].



Gambar 2.7. Suseptansi Model SVC (*Static Var Compensator*) [6]

Persamaan aliran daya untuk SVC (*Static Var Compensator*) adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial P_k^P}{\partial B_{SVC}^{PJ}} B_{SVC}^{PJ} = -V_k^P V_k^J B_{SVC}^{PJ} \sin(\theta_k^P - \theta_k^J) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial P_k^P}{\partial B_{SVC}^{PJ}} B_{SVC}^{PJ} = -2(V_k^P V_k^J B_{SVC}^{PJ} \sin(\theta_k^P - \theta_k^J)) \quad (2.19)$$

Matriks baru *Jacobian* dari persamaan linear dapat dibentuk seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} P_i^p \\ Q_i^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^p}{\partial \theta_i^p} & \frac{\partial P_i^p}{\partial \theta_i^p} V_i^p \\ \frac{\partial Q_i^p}{\partial \theta_i^p} & \frac{\partial Q_i^p}{\partial \theta_i^p} V_i^p \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^p \\ \Delta V_i^p \end{bmatrix}^{(i)} \quad (2.20)$$

Suseptansi *Static Var Compensator* (SVC) dapat diperbaharui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$B_{SVC}^p = B_{SVC}^{pj(i-1)} + \left( \frac{\Delta B^{pj}}{B_{SVC}^{pj}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{pj(i-1)} \quad (2.21)$$

### 2.9.1. Kompensasi Daya Reaktif SVC (*Static Var Compensator*)

Kompensasi daya reaktif pada suatu sistem distribusi sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan tegangan dalam sistem tenaga listrik. Apabila sistem terdapat banyak beban yang membutuhkan daya reaktif maka sistem tersebut akan mengalami perubahan tegangan akibat dari beban tersebut.

Dalam menentukan besarnya Suseptansi SVC (*Static Var Compensator*), ( $B_{svc}$ ) yang akan ditempatkan pada bus beban, dapat menggunakan persamaan aliran daya.

Arus yang mengalir pada SVC (*Static Var Compensator*) adalah:

$$I_{svc} = j B_{svc} V_{bus} \quad (2.22)$$

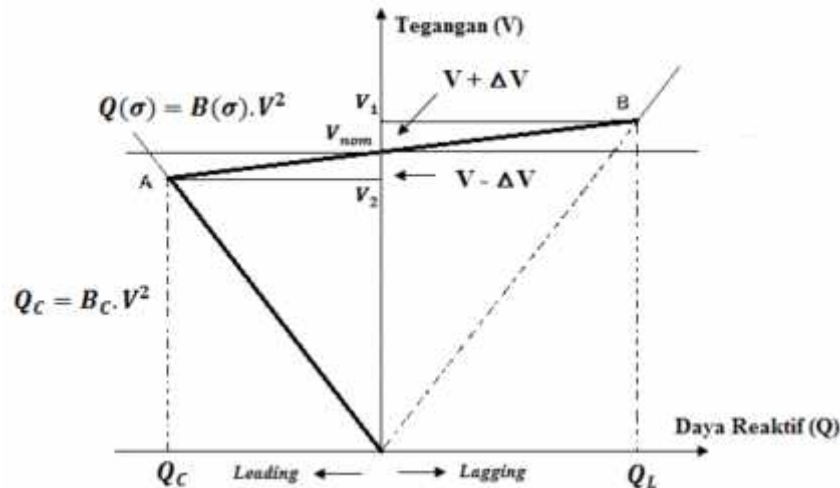
Sedangkan besarnya suseptansi SVC (*Static Var Compensator*) ( $B_{svc}$ ) dapat diaktifkan sebagai fungsi sudut konduksi *thyristor* ( ) berikut ini:

$$B_{svc} = B_C - B_L(\sigma) \quad (2.23)$$

Berdasarkan persamaan (2.22) dan (2.23), maka dapat dihitung daya reaktif yang diinjeksikan ke bus oleh SVC (*Static Var Compensator*) dengan persamaan (2.24) sebagai berikut:

$$Q_{svc} = -B_{svc} V_{bus}^2 \quad (2.24)$$

Kurva daya reaktif yang dihasilkan SVC (*Static Var Compensator*) terhadap tegangan bus yang dipasang SVC (*Static Var Compensator*) ditunjukkan pada Gambar berikut ini:



Gambar 2.8. 3 Kurva Daya Reaktif Dan Tegangan Pada SVC [13]

Dimana:

$Q_C$	: Daya Reaktif <i>Capasitif</i> (VAR)	$V_2$	: Tegangan Akhir (V)
$Q_L$	: Daya Reaktif <i>Induktif</i> (VAR)	$V$	: Perubahan Tegangan (V)
$V$	: Tegangan (V)	$B$	: Suseptansi ( <i>Siemens</i> )
$V_1$	: Tegangan Mula-mula (V)		

3 area kerja SVC (*Static Var Compensator*):

1. Area kerja pertama terdapat di antara  $V_1$  dan  $V_2$ . Diarea ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.
2. Area kerja kedua, bila tegangan bus melebihi  $V_1$ . Diarea ini SVC memiliki karakteristik induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem seperti diberikan pada persamaan (2.24)
3. Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari  $V_2$ . Di area ini SVC (*Static Var Compensator*) hanya berfungsi sebagai *fixed capacitor* saja

## 2.9.2. Penentuan Kapasitas SVC (*Static Var Compensator*)

Berdasarkan teori, indikasi bus yang berkandidat sebagai tempat pemasangan SVC (*Static Var Compensator*) adalah bus yang memiliki profil tegangan dibawah tegangan yang diizinkan, yaitu turun melebihi 5% dari tegangan nominal. Batas tegangan menurut PLN ada 3 macam yaitu:

1. Tanpa warna/tidak berwarna merupakan batas normal ( $101\% \leq V \leq 98\%$ ).
2. Warna merah muda/*pink* merupakan batas *marginal* yaitu batas maksimal  $102\% \leq V \leq 105\%$  dan batas minimal  $98\% \leq V \leq 95\%$
3. Warna merah merupakan batas *critical* yaitu melebihi batas tegangan maksimal  $105\%$  dan kurang dari batas minimal yaitu  $95\%$  ( $105\% > V > 95\%$ ).

Hal ini diupayakan agar mendapatkan tegangan pada ujung beban sama dengan ujung sumber atau  $|V_R| = |V_S|$  [4]. Bila nilai daya aktif pada ujung beban mendekati 1 ( $pf=1$ ) dan  $|V_R| = |V_S|$  maka dapat dicari nilai  $\delta$ , dengan rumus berikut:

$$P_R = \frac{|V_S| = |V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos(\beta - \alpha) \quad (2.25)$$

Kapasitas kapasitor ( $Q_R$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_R = \frac{|V_S| = |V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin(\beta - \alpha) \quad (2.26)$$

Berdasarkan faktor daya Q bisa dicari dengan persamaan berikut:

**kVAR sebelum SVC (*Static Var Compensator*):**

$$Q_1 = P \tan \theta_1 \quad (2.27)$$

**kVAR yang diinginkan berdasarkan PF=0.999**

$$Q_2 = P \tan \theta_2 \quad (2.28)$$

Berdasarkan persamaan (2.27) dan persamaan (2.28) maka dapat disempurnakan nilai Q dengan persamaan (2.29) dibawah berikut:

$$Q = Q_1 - Q_2 \quad (2.29)$$

Dimana,  $Q_1 = \text{kVAR sebelum SVC}$

$Q_2 = \text{kVAR yang diinginkan berdasarkan PF=0.999}$

## 2.10. ETAP 7.5.0

*ETAP (Electric Transient and Analysis Program)* merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat didalamnya pun bermacam-

macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Pada penelitian ini, SVC (*Static Var Compensator*) akan dimodelkan sebagai injeksi daya reaktif pada sistem tenaga listrik dilakukan analisa pengaruh penempatan SVC (*Static Var Compensator*) dengan menggunakan analisa aliran daya dalam merancang suatu sistem tenaga listrik perlu dilakukan simulasi terhadap sistem yang akan dibuat, hal ini dapat membantu penulis mempermudah menganalisa sistem tersebut handal atau tidak. Perangkat lunak yang bisaa digunakan untuk simulasi sistem tenaga listrik salah satunya adalah *Etap 7.5.0*. Perangkat lunak tersebut dikembangkan oleh perusahaan *operation technology inc*, dan mengalami perubahan versi dari tahun ke tahun[12].

Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan *Etap 7.5.0* antara lain :

1. Analisa aliran daya
2. Analisa hubung singkat
3. *Arc Flash Analysis*
4. Analisa kestabilan transien, dll.

Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.





Gambar 2.9. Elemen Standar *Etap 7.5.0*

Beberapa elemen yang digunakan dalam suatu diagram saluran tunggal adalah :

1. Generator

Merupakan mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 2.10. Simbol Generator Pada *Etap 7.5.0*

2. Transformator

Berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan dengan rasio tertentu sesuai dengan kebutuhan sistem tenaga listrik.



Gambar 2.11. Simbol *Transformator* Pada *Etap 7.5.0*

### 3. Pemutus Rangkaian

Merupakan sebuah saklar otomatis yang dirancang untuk melindungi sebuah rangkaian listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh kelebihan beban atau hubungan pendek.



Gambar 2.12. Simbol Pemutus Rangkaian Pada *Etap 7.5.0*

### 4. Beban

Di *ETAP 7.5.0* terdapat dua macam beban, yaitu beban statis dan beban dinamis.



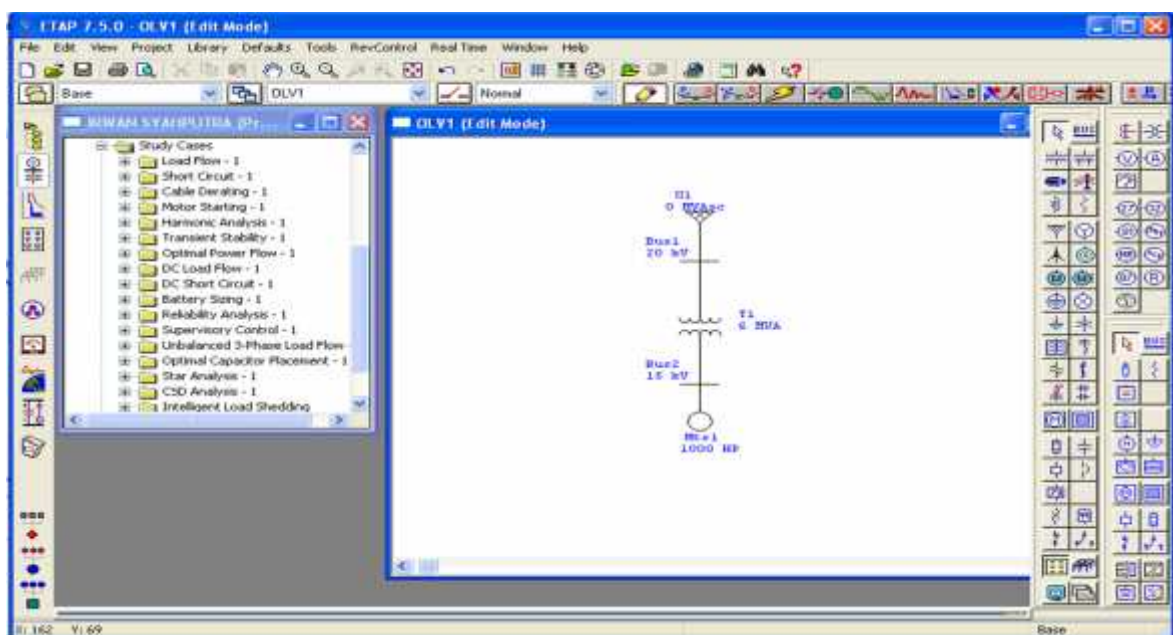
Gambar 2.13. Simbol Beban Statis Pada *Etap 7.5.0*

### 5. Bentuk tampilan SVC (*Static Var Compensator*) pada *Etap 7.5.0*



Gambar 2.14. Simbol SVC (*Static Var Compensator*) pada *Etap 7.5.0*

Tampilan perangkat lunak *Etap 7.5.0* secara umum dapat melihat gambar dibawah seperti terlihat dalam gambar terdapat beberapa *toolbar* seperti yang telah dijelaskan diatas. Untuk menampilkan hasil simulasi dapat melihat dalam *toolbar result/hasil*.



Gambar 2.15. Tampilan *Etap 7.5.0* Secara Keseluruhan

## 2.11. Langkah Kerja Penggunaan *Etap 7.5.0* Untuk Aliran Daya Dan Penempatan SVC (*Static Var Compensator*)

Menggunakan *Etap 7.5.0* dimulai dari awal hingga keluaran akhir penggunaan program.

1. Membuat *one-line* diagram sistem yang akan dibahas, dalam tulisan ini adalah sistem distribusi 20kV PT. PLN (Persero) Ranting BANGKINANG Wilayah Salo.
2. Masukan data studi kasus yang ditinjau.
3. Jalankan program *Etap 7.5.0* dengan memilih *icon optimal load flow analysis* pada *toolbar*. Program tidak jalan (*error*) apabila terdapat kesalahan, data yang kurang dapat dimasukan kembali.
4. Keluaran studi aliran daya dapat diketahui setelah program dapat dijalankan.
5. Setelah mendapat hasil dari aliran daya optimal. Selanjutnya menjalankan program dengan penempatan SVC (*Static Var Compensator*).
6. Hasil keluaran didapat dan membandingkan dengan hasil sebelum penempatan SVC (*Static Var Compensator*).

### 2.11.1. Prinsip Dasar Pengoperasian *ETAP 7.5.0*

Simulasi yang biasa dilakukan pada sistem distribusi adalah simulasi beban puncak sehingga data-data yang di-*input* adalah data jaringan dan peralatan saat beban puncak.

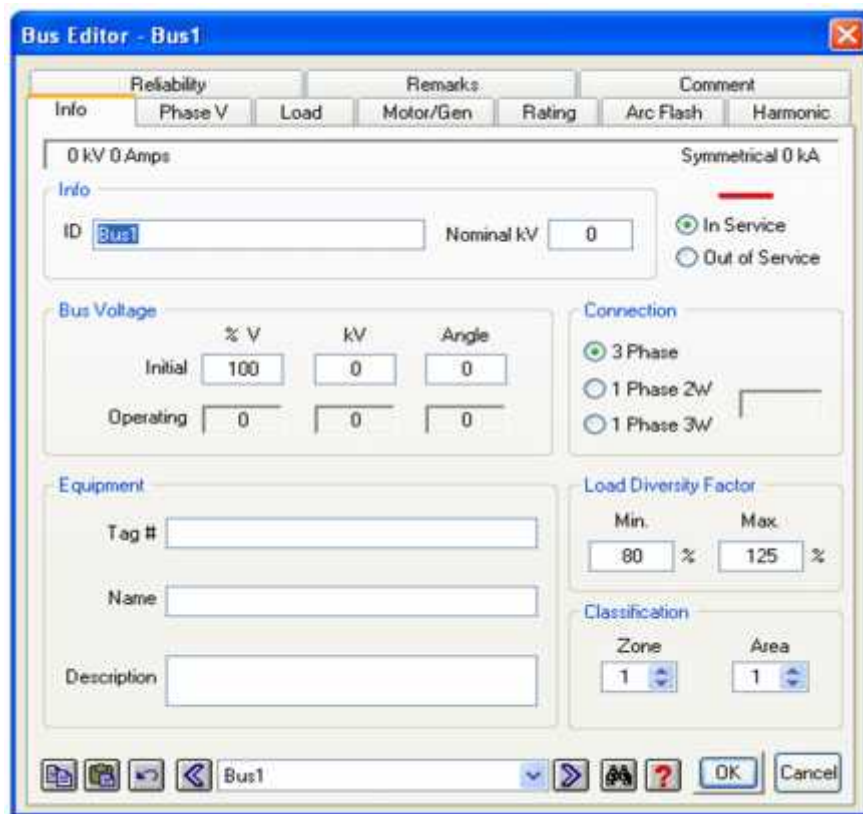
Berikut ini adalah prinsip kerja pada *Etap 7.5.0* :

1. Membuat *one-line* diagram dimulai dari *supply* berupa :
  1. *Power Grid* Gardu Induk (GI), bus sebagai titik pengukuran & penghubung antar peralatan, konduktor (*transmission line*).
  2. Beban trafo distribusi atau model beban *LUMPED (feeder)*, pembangkit listrik + trafo pembangkit.
2. Melakukan *setting ID, rating* dan pembebanan komponen.
3. Memasukkan ke mode simulasi aliran daya, dengan menekan tombol optimal *Power Flow Analysis* sehingga tampilan *toolbar editing* berubah menjadi *Toolbar Simulasi OPF*.
4. Menekan tombol '*Optimal Power Flow*', setelah dilakukan maka jika tidak ada *error* pada *one-line* diagram maka akan ditampilkan aliran daya disetiap cabang & bus.

5. Untuk menentukan tempat optimal penempatan SVC (*Static Var Compensator*) dengan menekan tombol 'Optimal SVC (*Static Var Compensator*)'.

## 2.12. *Setting Parameter Jaringan dan Peralatan Distribusi Pada Bus*

Bus pada *one-line* diagram *Etap 7.5.0* tidak hanya berarti fisik rel, tetapi lebih diperluas lagi untuk keperluan pengukuran atau hasil simulasi dan meletakkan atau menghubungkan peralatan-peralatan. Cukup lakukan *setting* ID dan nominal kV, biasanya 20kV, kecuali pada primer trafo pembangkit dipembangkit listrik disesuaikan dengan tegangan nominal keluaran generator.



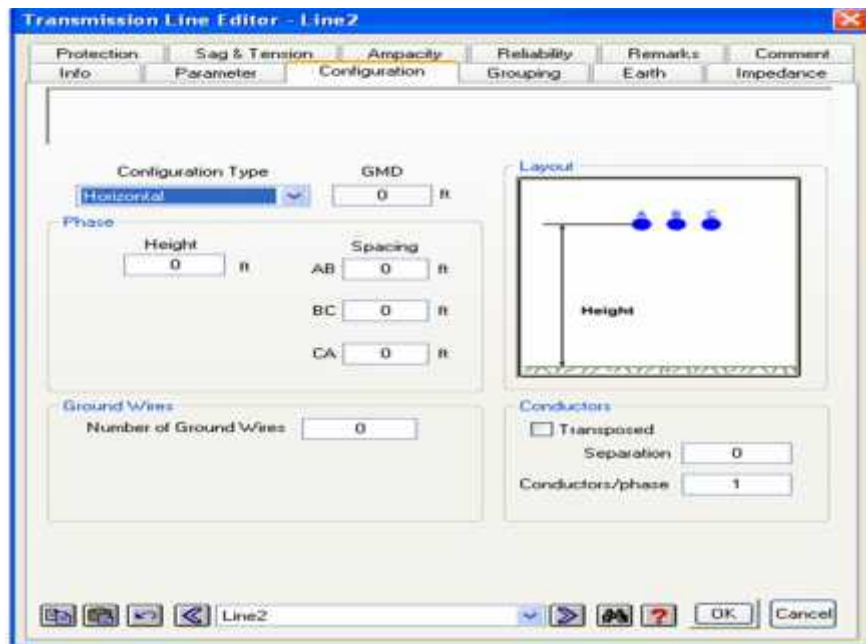
Gambar 2.16. Bus Editor Pada Program *Etap 7.5.0*

### 2.12.1. (*Transmission Line*) Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)

Langkah-langkah memasukkan data-data transmisi pada *Etap 7.5.0* :

1. Membuat master *setting* untuk setiap ukuran penampang SUTM yang ada
2. Mengisi ID
3. Mengisi panjang jaringan atau *Length* dalam kms
4. Memilih konfigurasi "*Horizontal*" dan isi *Spacing* antar konduktor.

5. Meng klik *Characteristics* dan isi jumlah konduktor per Phasa (1), Tipe Material, Resistansi, GMR dan Diameter.
6. *Grounding* tidak diisi, karena di SUTM tidak ada *ground wire*.
7. Mengisi impedansi untuk arus urutan positif dan urutan nol
8. *Reliability – default Etap 7.5.0*

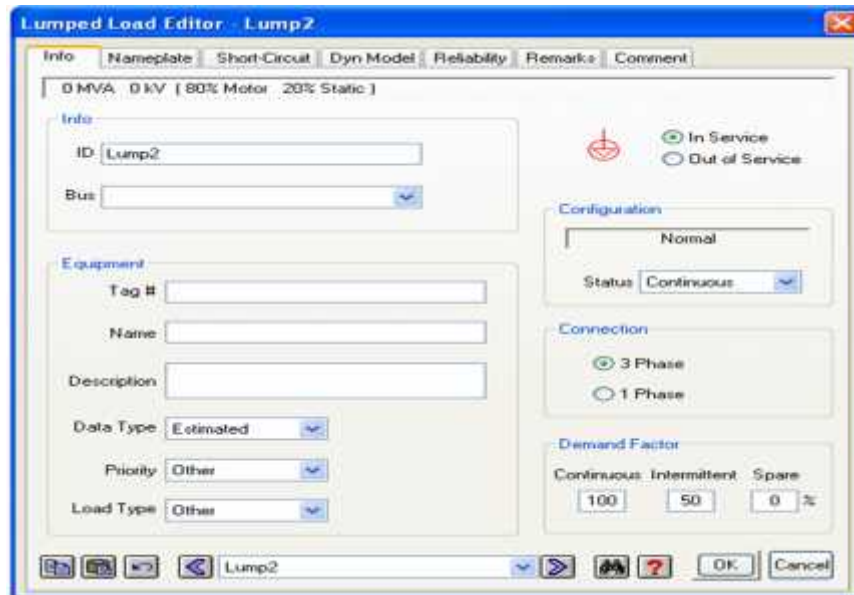


Gambar 2.17. *Transmission Lineeditor* Pada Program *Etap 7.5.0*

### 2.12.2. (Load) Beban

Pada *Etap 7.5.0* Beban terbagi 3 bagian, yaitu sebagai berikut :

1. Beban *Static/Impedance Constant* (selain motor)
2. Beban *Motor/Power Constant* (motor)
3. Beban *Lumped*/kombinasi beban *static* & motor pada simulasi sistem distribusi tegangan menengah, beban berupa trafo distribusi atau *outgoing feeder*, dimana pada keduanya ada porsi beban *static* dan porsi beban motor.



Gambar 2.18. *Lumped Load Editor* Pada Program *Etap 7.5.0*

Langkah-langkah memasukkan data *Load* atau beban pada *ETAP 7.5.0*:

1. Mengisi ID
2. Memilih satuan kVA, isi kVA beban dan persen PF ( $\cos \phi$ ).
3. Mengeset bar persentase komposisi beban *static* dan motor.
4. *Short-circuit* – default *Etap 7.5.0*, kecuali rubah koneksi ke Y dan tipe pentanahan *Solid*.
5. *Reliability* – default *Etap 7.5.0*

### 2.12.3. Trafo

Trafo pada simulasi jaringan distribusi biasanya untuk trafo pembangkit berupa 2-Winding Transformer.

The screenshot shows the '2-Winding Transformer Editor - T2' dialog box with the 'Info' tab selected. The top bar displays '0 MVA Liquid-Fill ONWF/ONAN 65 C' and '0 0 kV'. The 'Info' section includes fields for ID (T2), Prim. (dropdown), and Sec. (dropdown). The 'Connection' section has radio buttons for 3-Phase (selected) and 1-Phase, and a checkbox for Secondary Center Tap. The 'Standard' section has radio buttons for ANSI and IEC (selected). The 'Equipment' section has fields for Tag #, Name, and Description. The 'Type / Class' section has dropdowns for Type (Liquid-Fill), Sub Type (Mineral Oil), and Class (ONWF/ONAN), along with Temp. Rise (65) and MFR (empty). The bottom bar shows a list of transformers with 'T2' selected.

Gambar 2.19. 2-Winding Trasformer Editor Pada Program Etap 7.5.0

The screenshot shows the '2-Winding Transformer Editor - T2' dialog box with the 'Rating' tab selected. The top bar displays '0 MVA Liquid-Fill ONWF/ONAN 65 C' and '0 0 kV'. The 'Rating' section includes fields for Prim. kV, MVA, Max MVA, and FLA. The 'Connected Bus' section has a field for Nom. kV. The 'Impedance' section has fields for % Z and X/R for Positive and Zero sequences, and a button for Typical Z & X/R. The 'Z Variation' section has fields for @ - 5 % Tap and @ + 5 % Tap. The 'Z Tolerance' section has a field for % tolerance. The bottom bar shows a list of transformers with 'T2' selected.

Gambar 2.20. 2-Winding Trasformer Editor Pada Program Etap 7.5.0



#### 2.12.4. Menentukan *Rating SVC (Static Var Compensator)*

Langkah–langkah memasukkan nilai SVC (*Static Var Compensator*) pada *ETAP 7.5.0*.

1. Membuka aliran daya dengan *Etap 7.5.0*
2. Menentukan kandidat bus yang memiliki penurunan tegangan diatas 5%
3. Menentukan Q dengan persamaan (2.29).
4. Mengisi *rating* tegangan pada editor *Etap 7.5.0*

The screenshot shows the 'Static Var Compensator - SVC1' dialog box. The 'Rating' tab is selected. The 'Voltage Rating' section has fields for kV (1), Vmax (130 %), Vmin (70 %), and Vref (100 %). The 'Inductive Rating' section has fields for QL (0 Mvar), IL (0 Amp), and BL (0 Siemens). The 'Capacitive Rating' section has fields for Qc (0 Mvar), Ic (0 Amp), and Bc (0 Siemens). The 'Max Inductive Rating and Slope' section has fields for QLmax (0 Mvar), ILmax (0 Amp), and SLL (0 %). The 'Max Capacitive Rating and Slope' section has fields for Qcmax (0 Mvar), Icmax (0 Amp), and SLC (0 %). The bottom of the window has a toolbar with icons for file operations and a status bar showing 'SVC1'.

Gambar 2.21. SVC (*Static Var Compensator*) Pada Program *Etap 7.5.0*